

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор  
по образовательной деятельности КФУ  
Проф. Таюрский Д.А.

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Программа дисциплины**

Механизмы магнитной релаксации Б1.В.ДВ.5

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика

Профиль подготовки: Физика конденсированного состояния

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Дуглав А.В.

**Рецензент(ы):**

Еремин М.В.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Тагиров М. С.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_\_ от "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_\_ от "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No

Казань  
2016

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. (доцент) Дуглав А.В. Кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии Отделение радиофизики и информационных систем, Alexander.Dooglav@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины " Механизмы магнитной релаксации " являются:

- получение детального представления об основных механизмах и процессах электронной и ядерной спин-решеточной релаксации;
- получение навыков оценки скорости ядерной и электронной релаксации за счет различных процессов релаксации.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б1.В.ДВ.5 Дисциплины (модули)" основной образовательной программы 03.04.02 Физика и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 2 курсе, 3 семестр.

Профессиональный цикл М2. Необходимые "входные" знания: курс по физике конденсированного состояния, курс по радиоспектроскопии. Освоение данной дисциплины необходимо для всех последующих курсов, в которых рассматриваются методы исследования, связанные с измерениями релаксационных характеристик парамагнитных систем.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-1 (общекультурные компетенции)	способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу (ОК-1)
ОПК-5 (профессиональные компетенции)	способностью использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки (ОПК-5)
ОПК-6 (профессиональные компетенции)	способностью использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе (ОПК-6)
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-1)
ПК-3 (профессиональные компетенции)	способностью принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности (ПК-3)

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

Основные механизмы и процессы электронной и ядерной спин-решеточной релаксации.

2. должен уметь:

Оценивать скорость ядерной и электронной релаксации за счет различных процессов релаксации.

3. должен владеть:

методами расчета скорости спин-решеточной релаксации в рамках различных механизмов релаксации

углубленного самостоятельного изучения появляющихся новых подходов к изучению механизмов и процессов магнитной релаксации.

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных(ые) единиц(ы) 72 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет в 3 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.	3	1	1	1	0	устный опрос
2.	Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.	3	2	1	1	0	устный опрос
3.	Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.	3	3-4	2	1	0	тестирование

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
4.	Тема 4. Явление узкого фононного горла.	3	5	1	1	0	устный опрос
5.	Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.	3	6-7	2	2	0	устный опрос
6.	Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.	3	8-9	2	2	0	устный опрос
7.	Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.	3	10	1	1	0	тестирование
8.	Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках.	3	11-12	2	2	0	устный опрос
9.	Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.	3	13-14	2	1	0	устный опрос
	Тема . Итоговая форма контроля	3		0	0	0	зачет
	Итого			14	12	0	

#### 4.2 Содержание дисциплины

##### Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.

##### *лекционное занятие (1 часа(ов)):*

Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса. Взаимодействие спинов с полем электромагнитного излучения. Скорость спин-решеточной релаксации в двухуровневой системе. Спин-решеточная релаксация в многоуровневой системе в приближении высоких температур.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет  $T_1$  для двухуровневой системы.

**Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Взаимодействие спинов с полем теплового электромагнитного излучения. Скорость спин-решеточной релаксации в двухуровневой системе.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет  $T_1$  при релаксации за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.

**Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов. Механизм релаксации Валлера. Прямой и рамановский процессы спин-решеточной релаксации. Механизм электронной СРР Кронига-Ван-Флека. Приближение Орбаха. Прямой процесс. Релаксация парамагнитных ионов с четным и нечетным числом электронов. Двухфононный процесс релаксации через возбужденное состояние электронной оболочки (процесс Орбаха-Аминова). Двухфононный Рамановский процесс.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет скорости релаксации в механизме Кронига-Ван-Флека, прямой процесс, для парамагнитных ионов с четным и нечетным числом электронов.

**Тема 4. Явление узкого фононного горла.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Явление узкого фононного горла. Теплоемкость фононов резонансной частоты в полосе ширины линии ЭПР и теплоемкость спиновой системы. Релаксация в условиях фононного узкого горла. Фононная лавина.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет скорости релаксации при наличии фононного узкого горла.

**Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Механизм ядерной спин-решеточной релаксации в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленный модуляцией градиента КЭП. Квадрупольные моменты ядер. Взаимодействие с колебаниями решетки. Экспериментальное доказательство эффективности этого механизма.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет скорости ядерной спин-решеточной релаксации, обусловленной модуляцией градиента КЭП.

**Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами. Изолированная электронно-ядерная пара. Подход, основанный на модели случайного поля. Подход, основанный на перемешивании электронно-ядерных состояний.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет скорости ядерной спин-решеточной релаксации для ядер, ближайших к парамагнитной примеси, и ядер, максимально удаленных от парамагнитных центров (в приближении однородного распределения парамагнитных центров).

**Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Ядерная спиновая диффузия. Спин-решеточная релаксация системы ядерных спинов, обусловленная невзаимодействующими между собой парамагнитными центрами. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Понятие о диполь-дипольном резервуаре. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси. Экспериментальные доказательства существования этого механизма.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет скорости ядерной релаксации через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии для различных размерностей распределения парамагнитных центров.

**Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках. Солид-эффект при хорошем спектральном разрешении. Достижимая степень поляризации ядер.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет величины и скорости установления равновесной ядерной поляризации в случае  $I=S=1/2$ .

**Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах. Модель свободных электронов. Восприимчивость Паули. Найтовский сдвиг. Соотношение Корринги.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Определение соотношения между скоростью релаксации и найтовским сдвигом в металлах.

**4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)**

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.	3	1	Чтение рекомендованной литературы	2	устный опрос
2.	Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.	3	2	Чтение рекомендованной литературы	2	устный опрос
3.	Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.	3	3-4	подготовка к тестированию	8	тестирование

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
4.	Тема 4. Явление узкого фононного горла.	3	5	Чтение рекомендованной литературы	4	устный опрос
5.	Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диэлектрических кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.	3	6-7	Чтение рекомендованной литературы	6	устный опрос
6.	Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.	3	8-9	Чтение рекомендованной литературы	6	устный опрос
7.	Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.	3	10	подготовка к тестированию	2	тестирование
				Чтение рекомендованной литературы	4	Устный опрос
8.	Тема 8. Динамическая поляризация ядер диэлектрических атомов в твердых диэлектриках.	3	11-12	подготовка к устному опросу	8	устный опрос
9.	Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.	3	13-14	Чтение рекомендованной литературы	4	устный опрос
	Итого				46	

### 5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

Лекции, самостоятельная работа студента (выполнение индивидуальных заданий), консультации.

### 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов



### **Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекции и гл.1, ♦3 книги Сликтера "Основы теории магнитного резонанса". (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.10, ♦1 книги Абрагама, Блини "Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов", т.1. (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.**

тестирование , примерные вопросы:

Расчет скорости релаксации на заданной частоте по известной скорости релаксации на другой частоте. Определение вида процессов релаксации. (ОК-1, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-3)

### **Тема 4. Явление узкого фоновго горла.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.10, ♦6 книги Абрагама, Блини "Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов", т.1. (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.9Г, ♦11 книги Абрагама "Ядерный магнетизм". (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.6, ♦Б книги Абрагам, Гольдман, "Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок", т.2. (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.**

тестирование , примерные вопросы:

Расчет скорости релаксации ядер решетки заданного кристалла через заданные примесные парамагнитные центры, ближайшие к ядрам, и наиболее удаленные от ядер, без учета ядерной спиновой диффузии. (ОК-1, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-3)

Устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.6, ♦В, Г книги Абрагам, Гольдман, "Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок", т.2. (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.5, \$2 книги Абрагама "Ядерный магнетизм", гл.6, ♦Б, Г книги Абрагам, Гольдман, "Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок", т.2. (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.9А книги Абрагама "Ядерный магнетизм". (ОК-1, ОПК-5)

### **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к зачету:

Зачет в соответствии с приведенной выше программой; контрольные тесты, формируемые на основе следующей литературы:

1. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
2. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. М.: Мир, 1965.

Пример вопросов тестов:

Скорость спин-решеточной релаксации некоего иона с нечетным числом электронов в незаполненной оболочке, измеренная на ЭПР-релаксометре с частотой 9.4 ГГц (X-диапазон), в диапазоне температур 4 - 10 К имеет следующую температурную зависимость:

(приводится температурная зависимость)

Какому процессу релаксации соответствует каждое из слагаемых? Какой будет температурная зависимость скорости спин-решеточной релаксации, измеренной на релаксометре с частотой 36 ГГц?

Пример вопросов на зачет:

Прямой (однофононный) процесс в рамках механизма Кронига-Ван-Флека.

Пример задач на зачет:

Имеется кристалл лантан-магниевого нитрата (LMN), допированный изотопом неодима-142 (ядерный спин равен нулю), концентрация  $s = 1$  процент. Осуществляется поляризация ядер водорода за счет солид-эффекта (насыщение запрещенных переходов ЭПР неодима). Паразитная примесь - церий с концентрацией 0,05 процента. Найти стационарную ядерную поляризацию и скорость установления ядерной поляризации при частоте накачки 36 ГГц, при температурах  $T = 4,2$  К и  $T = 0,5$  К. Расчет провести: а) без учета утечки через церий; б) с учетом утечки.

### 7.1. Основная литература:

1. Сергеев, Н. А. Основы квантовой теории ядерного магнитного резонанса : монография / Н. А. Сергеев, Д. С. Рябушкин. - М. : Логос, 2013. - 272 с. - ISBN 978-5-98704-754-5  
<http://znanium.com/bookread.php?book=469025>
2. Минько, Н. И. Методы получения и свойства нанообъектов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Н. И. Минько, В. В. Строкова, И. В. Жерновский, В. М. Нарцев. - 2-е изд., стер. - М. : ФЛИНТА, 2013. - 165 с. - ISBN 978-5-9765-0326-7  
<http://znanium.com/bookread.php?book=462886>
3. Травень, В. Ф. Органическая химия. Том 2 [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов : в 3 т. / В. Ф. Травень. - 3-е изд. (эл.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 517 с.: ил. - (Учебник для высшей школы). - ISBN 978-5-9963-2110-0 (Т. II), ISBN 978-5-9963-0357-1.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=8693](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=8693)

### 7.2. Дополнительная литература:

1. А.Абрагам, Б.Блини. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: Мир, 1973, т.1.
2. А.Абрагам. Ядерный магнетизм. М.: ИЛ, 1963.
3. А.Абрагам, М.Гольдман. Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок. М.: Мир, 1984, т.2
4. Ч.Сликтер. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1981.
5. А.Г.Гуревич. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
6. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
7. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. М.: Мир, 1965.
8. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.

### **7.3. Интернет-ресурсы:**

Википедия - <http://ru.wikipedia.org>

Все для студента - <http://www.twirpx.com/>

Научная библиотека им. Н.И.Лобачевского - [http://www.kpfu.ru/main\\_page?p\\_sub=5056](http://www.kpfu.ru/main_page?p_sub=5056)

Электронно-библиотечная система - <http://ibooks.ru>

Электронные книги - <http://eknigi.org/>

### **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)**

Освоение дисциплины "Механизмы магнитной релаксации" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, УМК, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань" , доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.

Учебные аудитории для проведения лекционных и практических занятий, методические пособия, Интернет

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 03.04.02 "Физика" и магистерской программе Физика конденсированного состояния .

Автор(ы):

Дуглав А.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

Еремин М.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.